

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.3:656.56

3.4. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

ANALYSIS OF POWER CHARACTERISTICS OF HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS FOR SPEED CONTROL OF TURBOCOMPRESSORS

Серебряков Артем Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24. E-mail: serebryakov@ardman.ru Тел.: +7 (831) 423-10-55

Крюков Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, главный специалист ОАО «Гипрогазцентр», Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, 26. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru . Тел.: +7 (831) 428-25-84

Artem V. Serebryakov, Cand.Tech.Sc., senior lecturer of the chair «Electric equipment, electric drive and automatics», R.E.Alekseev Nizhegorodsky State Technical University, Russia, 603155, Nizhniy Novgorod, 24, Minina street. E-mail: serebryakov@ardman.ru Tel.: +7 (831) 423-10-55

Oleg V. Kryukov, Cand.Tech.Sc., senior lecturer, chief specialist of JSC "Giprogaзcenter", Russia, 603950, Nizhniy Novgorod, 26, Alekseevskaya str. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru . Tel.: +7 (831) 428-25-84

Аннотация: Представлен анализ особенностей топологии и энергетических характеристик современных высоковольтных преобразователей частоты для электроприводных компрессорных станций. Рассмотрены особенности схемных структур и функциональных возможностей многоуровневых преобразователей отечественного производства для повышения энергоэффективности и надежности электроприводов. Проведено моделирование гармонического состава выходного напряжения и тока высоковольтных преобразователей частоты и получены осциллограммы выходных характеристик и гармонические спектры параметров 5 наиболее типичных структур преобразователей частоты при работе на активно-индуктивную нагрузку. Представлены результаты расчета коэффициентов искажения выходного напряжения и тока и соответствующие уровни спектров частот.

Abstract: The analysis of the topology features and power characteristics of modern high-voltage converters of frequency is presented. The features of the circuit structures and the functional capabilities of multilevel converters of domestic production for power efficiency and reliability increase of electric drives have been considered. There conducted the simulation of a harmonic composition of output voltage and current of high-voltage converters of frequency and received the oscillograms of output characteristics and harmonious spectra of the parameters of 5 most typical structures of converters of frequency at the work for an active-inductive loading The results of calculation of the factors of distortion of output voltage and current and the corresponding levels of spectra of the frequencies have been presented.

Ключевые слова: преобразователь частоты; высоковольтный электропривод; энергетические характеристики; турбокомпрессоры; регулирование скорости.

Keywords: frequency converter, high-voltage electric drive, power characteristics, turbo-compressors, speed control.

ВВЕДЕНИЕ

Электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) являются основными установками компрессорных станций (КС) всех магистральных газопроводов (МГ) [1,2]. Концепцией энергоэффективности и развития ЭГПА [3,4] определена устойчивая тенденция перехода на частотное регулирование электроприводов на базе отечественных высоковольтных преобразователей частоты (ВВ ПЧ) [5,6].

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВВ ПЧ

Одним из основных энергетических показателей, характеризующих технический уровень ВВ ПЧ, является степень искажения формы выходного напряжения и тока ПЧ в ЭГПА. Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных ПЧ с примыкающими сетями связана с потреблением реактивной мощности на основной частоте и искажениями формы тока в сети. Ограничение потребления реактивной мощности

до нормативных $\cos\phi$ обычно обеспечивается в ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН) и неуправляемым выпрямителем (НВ). Для активных выпрямителей (АВ) в автономных инверторах тока (АИТ) имеются дополнительные фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ).

Нормы качества электроэнергии установлены ГОСТ 13109-97, который определяет коэффициент искажения кривой напряжения как полный коэффициент гармоник (THD). Нормально допустимые THD сетей 6-20 кВ не должно превышать 5 и 8%. При разложении в ряд кривой напряжения ограничиваются 40-ой гармоникой.

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ВВ ПЧ

1. Имитационная модель двухуровневого АИН на IGBT в среде Matlab-Simulink показана на рис. 1.

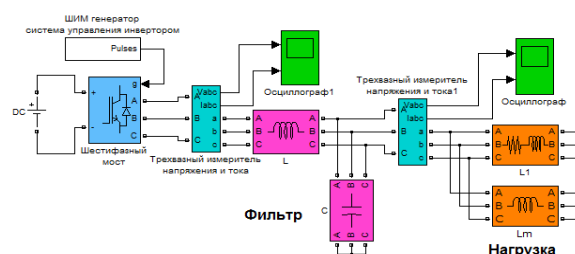


Рис. 1. Модель двухуровневого АИН.

Модель является базовой и состоит из идеального источника постоянного напряжения. ПЧ включает трехфазный АИН с ключами IGBT, встречно-параллельно транзисторам включены диоды для пропускания индуктивных токов при активно-индуктивной нагрузке в момент коммутации.

При скалярном принципе регулирования выходных параметров ПЧ в диапазоне до 10:1 и продолжительном режиме, характерных для мощных электроприводов турбокомпрессоров с вентиляторной нагрузкой, используется закон управления $U/f = \text{const}$.

При моделировании использовались следующие значения индексов ШИМ: при частоте инвертора 50 Гц индекс модуляции равен 1; при частоте инвертора 30 Гц равен 0,6; при частоте 15 Гц, индекс модуляции равен 0,3. Напряжение инвертора при этом меняется в соответствии с известным выражением $U_{ab} = 1,73m_a U_d / 2$, а напряжение источника постоянного напряжения при питании от сети 6 кВ составляет $U_d = 9798$ В.

2. Имитационная модель двухтрансформаторной схемы ПЧ с низковольтным АИН отличается от представленной на рис. 1 тем, что в нее добавлен блок трансформатора, а напряжение источника принимается $U_d = 1126$ В. Между АИН и АД устанавливается повышающий трансформатор для

согласования инvertируемого напряжения с напряжением машины.

3. Имитационная модель ПЧ с трехуровневым АИН на IGBT или IGCT состоит из двух источников напряжения с общей точкой, которые моделируются идеальными. Поэтому она отличается от модели на рис. 1 наличием блока трехуровневого моста. Амплитуда напряжения АИН формируется двумя АИН с $U_d = 4899$ В.

4. Имитационная модель ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением инверторных модулей (для 11-уровневого АИН) в среде Matlab-Simulink, представлена на рис. 2.

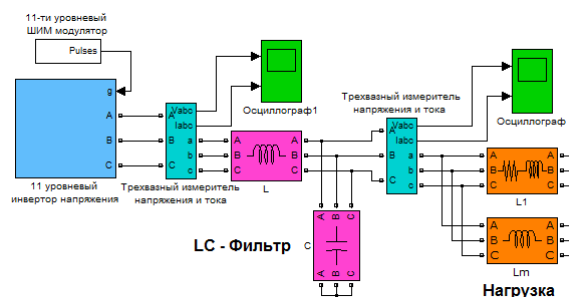


Рис. 2. Модель ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением АИН.

Инвертор состоит из 15 ячеек однофазных двухуровневых АИН соединенных в звезду по 5 ячеек последовательно в луче. 11 уровней напряжения достигаются последовательным соединением 5 источников напряжения в каждой фазе плюс нулевое значение. Напряжение каждого из источников $U_d = 979,8$ В. Остальные элементы модели фильтр, нагрузка, измерительные элементы аналогичны предыдущим моделям.

5. Имитационная модель с ШИМ выпрямителем и ШИМ АИТ на SGCT представлена на рис. 3.

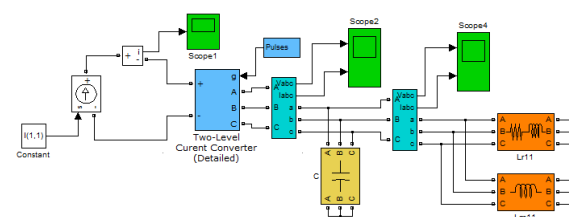


Рис. 3. Модель ПЧ с ШИМ выпрямителем и ШИМ инвертором тока на SGCT

Модель состоит из идеального источника тока, АИТ и нагрузки из R - L сопротивлений T -образной схемы замещения АД. Ключи АИТ идеальны, без временной задержки при отключении, САУ АИТ гарантирует отсутствие разрыва цепи постоянного тока в момент коммутации ключей. Специальные буферные конденсаторы и С-фильтр параллельно нагрузке необходимы для совместности АИТ с индуктивной нагрузкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ВВ ПЧ

Измерения линейного напряжения между фазами А и В, и тока фазы А, а также спектрального анализа напряжения и тока на выходе ПЧ получены при изменении значений частоты ШИМ и выходной частоты инвертора. Всего было получено более 600 осциллограмм. Приведем наиболее характерные.

1. Результаты моделирования ПЧ с двухуровневым инвертором напряжения на IGBT представлены в табл. 1. Функции THDU и THDI двухуровневого АИН для различных значений частот инвертора и частот ШИМ для двигателей различной мощности (полный спектр гармоник) даны на рис. 4, а характерные осциллограммы – на рис. 5.

Таблица 1.

Значения THD двухуровневого инвертора напряжения при полном учете гармоник

Частота ШИМ: 1000 Гц

Р ад, кВт	800			1250			3150		
f инв, Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,58	120,5	197,5	68,58	119,7	197,3	68,58	120,3	197,8
THD I, %	9,7	15,23	9,7	8,6	13,74	9,06	9,74	15,3	9,656

Частота ШИМ: 1500 Гц

Р ад, кВт	800			1250			3150		
f инв, Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,58	120,4	197,4	68,61	120,5	197,4	68,62	120,5	197,4
THD I, %	6,5	10,47	7,15	5,75	9,385	6,573	6,55	10,5	7,143

Частота ШИМ: 2500 Гц

Р ад, кВт	800			1250			3150		
f инв, Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,67	120,5	197,8	68,67	120,5	197,8	68,68	120,5	197,8
THD I, %	3,92	6,39	4,59	3,46	5,712	4,16	3,948	6,418	4,592

Таблица 2

Значения THD (для гармоник $n \leq 40$), полученные в результате моделирования двухуровневого АИН

F ШИМ, Гц	1000			1500			2500		
f инв, Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
TDH U, %	48,57	31	3,2	45,03	0,6	0,8	0,72	1,23	1,5

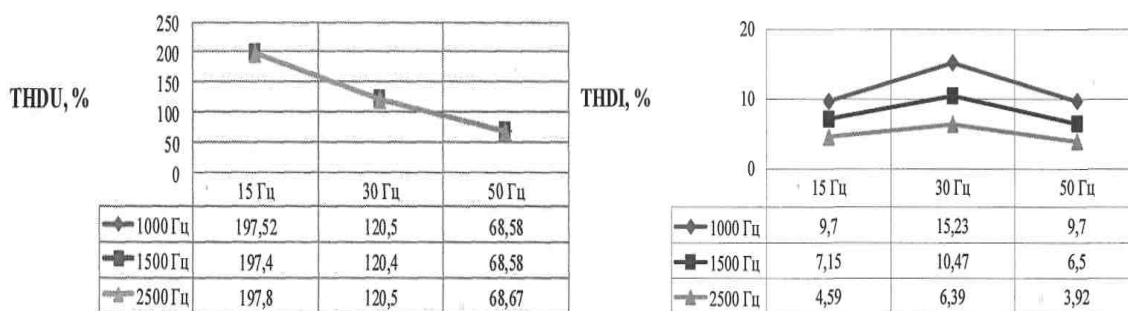


Рис. 4. Зависимости коэффициента гармоник напряжения и тока от частоты инвертора при разных частотах ШИМ ($P_{ад}=800, 1250, 3150$ кВт).

Исследование гармонического состава выходного напряжения двухуровневого АИН проведено и на частоте ШИМ 2500 Гц. Сравнение полученных результатов с данными табл. 1 показывает, что при снижении выходной частоты и напряжения, гармонический состав напряжения существенно ухудшается. Зависимость THDU напряжения (гармоники $n \leq 40$) двухуровневого АИН для различных значений частот инвертора и ШИМ приведена в табл. 2. Таким образом, проведенный анализ гармоник данного АИН констатирует:

- Гармонический состав двухуровневого АИН без выходного фильтра крайне неблагоприятен. THDU достигает 200 % и использование данных ПЧ без мощного выходного фильтра невозможно. Коэффициент гармоник тока также велик – до 15% при частоте ШИМ 1000 Гц, снижаясь до величины 6,4% при частоте ШИМ 2500 Гц.
- При снижении выходной частоты и напряжения изменяется индекс модуляции, при этом ухудшается гармонический состав. При более глубоком снижении частоты THDU возрастает еще более значительно до 1,5 раз.

- Увеличение частоты ШИМ не сказывается на величине THDU, которая остается чрезмерно высокой даже при ШИМ 2500 Гц. Увеличение ШИМ до 2500 Гц уменьшает коэффициент THDI почти в 100 раз. Коэффициент THDI при росте частоты ШИМ снижается и мало зависит от частоты АИН.

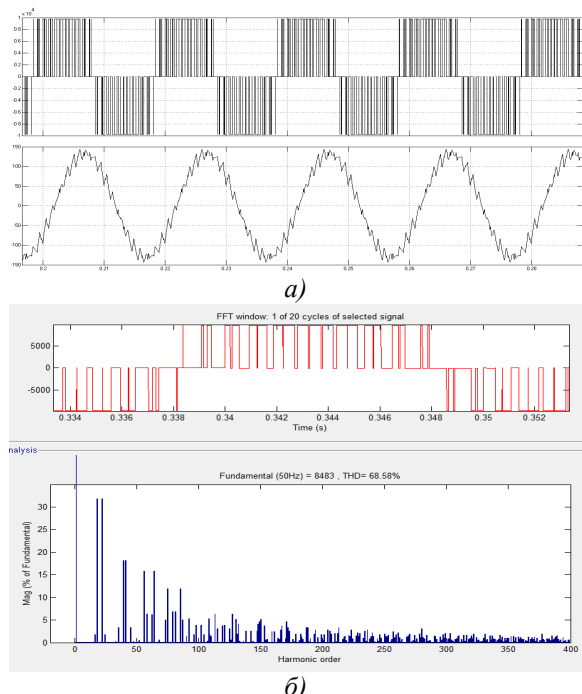


Рис. 5. Двухуровневый АИН без фильтра (при частоте ШИМ 1000 Гц и частоте инвертора 50 Гц): а) напряжение и ток нагрузки; б) напряжение нагрузки и спектр гармоник напряжения

- Гармонический состав напряжения ПЧ не зависит от мощности АД 6,0 кВт. THDI мало зависит от мощности АД для всех вариантов ПЧ.

- Применение синусного фильтра на выходе ПЧ позволяет снизить состав гармоник напряжения и тока: THDU до 4%, тока до 0,5%.

2. Результаты моделирования ПЧ с трехуровневым АИН на IGBT или IGCT:

- Искажение кривой выходного напряжения для трехуровневого АИН без фильтров имеет существенно меньшие значения THD по сравнению с двухуровневым инвертором. Характер зависимости THD от выходной частоты ШИМ аналогичен двухуровневым АИН. Величина THD мало зависит от мощности двигателя.

- Применение Г-образного синусного фильтра при частоте ШИМ 1000 Гц позволяет получить допустимые значения THD напряжения и тока при изменении выходной частоты во всем диапазоне.

3. Результаты анализа ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением пяти инверторных модулей (11-уровневый АИН):

- Для каскадных АИН первые всплески гармоник появляются на частотах много выше частот ШИМ.

- THDU не зависит от частоты ШИМ и с ростом частоты ШИМ растет частота гармоник, их набор сдвигается в область ВЧ, а амплитуда сохраняется. THDU меньше 1 % (для $f_{\text{ШИМ}} = 1$ кГц).

- Искажение формы тока на выходе 11-уровневого АИН незначительно, а THDI не превышает 1 %. С увеличением частоты ШИМ наличие гармоник в токе еще более уменьшается.

4. Результаты анализа двухтрансформаторной схемы с низковольтным АИН:

- При отсутствии фильтра k_n напряжения очень большой, и использование данной схемы без выходного фильтра невозможно.

- Ступенчатый характер формы выходного напряжения ПЧ связан с тем, что выходной трансформатор имеет схему обмоток Δ/Y .

- Применение низковольтного LC-фильтра на выходе инвертора позволяет снизить k_n напряжения и тока до допустимых значений, но требуемая мощность фильтра весьма велика.

5. Результаты моделирования ПЧ с ШИМ АВ и ШИМ АИТ на SGCT с С-фильтром:

- Для АИТ характерно большее искажение формы выходного напряжения, чем формы выходного тока. В ПЧ этого типа необходимо использование С-фильтров на выходе ПЧ. Инверторы с ШИМ тока имеют малый диапазон частоты ШИМ.

- Применение выходного С-фильтра с реактивной мощностью 125 % от реактивной мощности АД позволяет иметь нормальные значения THD тока и напряжения даже при частоте ШИМ 500 Гц.

- Увеличение степени компенсации реактивной мощности двигателя улучшает гармонический состав выходного тока и напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроприводы объектов газотранспортных систем / Под ред. О.В. Крюкова. Н.Новгород: Исток, в 6 тт., том 4, 2013. – 300с.
2. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // Електромеханічні І енергозберігаючі системи, 2012, №3. – С.209-212.
3. Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Рубцова И.Е. Энергосбережение в агрегатах КС средствами ЧРП // Наука и техника в газовой промышленности, 2012, №2. – С.98-106.
4. Крюков О.В. Регулирование ГПА преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика, 2013, №3. – С.21-24.
5. Крюков О.В. Частотное регулирование ЭГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2014, №6. – С.39-44.
6. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности ЭГПА // Газовая промышленность, №6, 2014. – С.86-89.